

сушки. Сформулированы и записаны в математическом виде граничные условия для поверхности древесины в процессе сушки.

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 372 с.
2. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
3. Сушка древесины. Справочник. Серия: «Деревообработка» / Составители Алюшин С., Березовский В., Билей П., Бурیشهв С., Стрекалов С. – К.: ТМА «Тристан», 2004. – 448 с.
4. Селюгин Н.С. Сушка древесины. – Л.: Гослестехиздат, 1936. – 560 с.
5. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М. - Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 527 с.
6. ГОСТ 19773-84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия.
7. Руководящие материалы по камерной сушке пиломатериалов. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1977. – 153 с.
8. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 143 с.

*Получено 29.09.2011*

УДК 621.131

**М.В.ЧЕРНЯВСКАЯ, И.Т.КАРПАЛЮК, М.Л.ГЛЕБОВА**, кандидаты техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Разработаны статистические модели для расчета формы кривой тока статора вентильных двигателей постоянного тока. Использована теория оптимального планирования эксперимента, что позволило значительно ускорить процесс исследования при одновременном повышении достоверности результатов. Полученные модели дают возможность анализа исследуемых функций, сочетающих простоту обработки и инженерную применимость.

Розроблено статистичні моделі для розрахунку форми кривої струму статора вентильних двигунів постійного струму. Використана теорія оптимального планування експерименту, що дозволило значно прискорити процес дослідження при одночасному підвищенні достовірності результатів. Отримані моделі дають можливість аналізу досліджуваних функцій, що поєднують простоту обробки і інженерну застосовність.

Statistical models are worked out for the calculation of form of curve of current of stator of valve engines of direct-current. The theory of the optimal planning of experiment is used, that allowed considerably to accelerate the process of research at the simultaneous increase of authenticity of results. The got models enable analysis of the investigated functions, combining simplicity of treatment and engineering applicability.

*Ключевые слова:* синхронная машина, вентильный двигатель, система дифференциальных уравнений.

Для систем электропривода с вентильными двигателями большой мощности конечное число фаз, а также неполная управляемость тири-

сторонних преобразователей с естественной коммутацией приводят к появлению в токе питания увеличение добавочных потерь, появление дополнительных составляющих электромагнитных сил и моментов, ухудшающих технические характеристики вентильных двигателей постоянного тока (ВДПТ). Оценка этих явлений может быть проведена на основе гармонического анализа токов ВДПТ с учетом реальных возмущений.

Один из эффективных путей определения гармонического состава фазных токов заключается при совместном решении двух задач:

- проведения численного эксперимента по определению качественного и количественного уровней высших временных гармоник при варьировании параметров приводного двигателя и полупроводникового преобразователя;

- разработки статистических моделей, сочетающих необходимое требование точности, простоты и инженерной применимости на любом этапе создания ВДПТ.

Численный эксперимент проводился с использованием математической модели высокого уровня, подробно описанной в [1], и позволяющей найти в установившихся режимах точную форму фазного тока. Обработка вероятностными методами большого количества расчетных данных для различных параметров и режимов работы ВДПТ, позволила сформулировать весьма простые статистические модели, которые в заданном диапазоне изменения варьируемых величин дают возможность с высокой достоверностью определить гармонический состав токов.

Оптимальное планирование эксперимента, позволяет значительно ускорить процесс исследования при одновременном повышении достоверности результатов. Укажем первоначально на этапы проведенных исследований:

1. На первом этапе определяются факторы, влияние которых представляет интерес и наиболее существенно с позиции постановки задачи.

2. На втором – ограничиваются области варьирования этих факторов, исходя из реальных физических условий режимов работы ВДПТ.

3. На третьем этапе, используя возможности теории оптимального планирования эксперимента, определяется оптимальный план постановки численного эксперимента, их минимально необходимое количество, а также возможность группирования параметров, одновременное варьирование которых физически приемлемо для данной системы ВДПТ.

4. Далее устанавливаем тип статистического уравнения, который выбирается соответственно рекомендациям, приведенными в [2], исходя из сложности и нелинейности исследуемых функций в зависимости от факторов. После этого непосредственно осуществляется сам численный

експеримент по математической модели ВДПТ постоянного тока [1].

5. На базе данных, взятых из оптимального плана и полученных из приведенного численного эксперимента, проводится статистическая процедура их обработки, известная из [3] под названием SVD и реализованная по стандартной программе, позволяющей получить расчетные величины постоянных коэффициентов статистических уравнений, проверяемых также на статистические критерии – адекватность, точность и надежность.

6. По набору постоянных статистических коэффициентов появляется возможность качественного и количественного анализа исследуемых функций, сочетающего простоту обработки и инженерную применимость.

Для ВДПТ с неявнополюсным ротором были выбраны следующие факторы:  $\beta_0$ ,  $x_{op}$ ,  $i_f$ ,  $i_d$ ,  $x_\sigma$ ,  $x_{\sigma 1,2}$ ,  $x_{\sigma d}$ ,  $x_{\sigma q}$ .

Области варьирования всех факторов представлены в табл.1. Для осуществления полнофакторного эксперимента (ПФЭ) по исследуемым функциям необходимо произвести  $N = m^n$  экспериментов, где  $N$  – число экспериментов,  $n$  – количество факторов,  $m$  – число уровней этих факторов [2]. Используя теорию планирования, было уменьшено число экспериментов при практически той же точности аппроксимации в результате оптимизации исходного классического ПФЭ с одновременной рандомизацией (переборам входящих переменных факторов случайным образом).

Таблица 1

Области варьирования уровней факторов									
Шестифазная обмотка статора - ВД6									
	0	1	2	3		0	1	2	3
$\beta_l$	30.	40.	50.	60.	$x_\sigma$	0.06	0.07	0.08	0.09
$x_{op}$	0.08	0.23	0.46	0.92	$x_{\sigma 1,2}$	0.015	0.025	0.035	0.045
$i_f$	1.20	1.40	1.60	1.70	$x_{\sigma d}$	0.039	0.078	0.156	0.234
$i_d$	0.30	0.40	0.45	0.50	$x_{ad}$	1.26	1.30	1.36	1.42
Трехфазная обмотка статора - ВД3									
$\beta_l$	30.	40.	50.	60.	$x_\sigma$	0.06	0.07	0.08	0.09
$x_{op}$	0.04	0.115	0.23	0.46	$x_{\sigma d}$	0.039	0.078	0.156	0.234
$i_f$	1.20	1.40	1.60	1.70	$x_{ad}$	1.24	1.30	1.36	1.42
$i_d$	0.60	0.70	0.80	0.90		-	-	-	-

Дробно-факторный эксперимент komponует оптимальный план в виде матрицы (D), представленной в табл.2. Подставив в матрицу D численные значения факторов по уровням, получим развернутую мат-

рицу эксперимента (A), которая представлена в табл.3, 4 для каждого типа обмоток статора.

Таблица 2

№ опыта	Оптимальный план эксперимента - матрица – D				№ опыта	Оптимальный план эксперимента - матрица – D			
1	0	0	0	0	9	0	3	3	2
2	2	0	2	1	10	2	3	1	3
3	3	0	3	3	11	3	3	0	1
4	1	0	1	2	12	1	3	2	0
5	0	2	2	3	13	0	1	1	1
6	2	2	0	2	14	2	1	3	0

Таблица 3

Эксперимент - матрица A - при ВД6 в зависимости от первой и второй групп факторов								
VAR	$\beta_0$	$x_{op}$	$i_f$	$i_d$	$x_\sigma$	$x_{\sigma l,2}$	$x_{\sigma d}$	$x_{ad}$
1	30.	0.08	1.20	0.300	0.06	0.015	0.039	1.26
2	50.	0.08	1.60	0.400	0.08	0.015	0.156	1.30
3	60.	0.08	1.70	0.500	0.09	0.015	0.234	1.42
4	40.	0.08	1.40	0.450	0.07	0.015	0.078	1.36
5	30	0.46	1.60	0.463	0.06	0.035	0.156	1.42
6	50.	0.46	1.20	0.450	0.08	0.035	0.039	1.36
7	60.	0.46	1.40	0.300	0.09	0.035	0.078	1.26
8	40.	0.46	1.70	0.400	0.07	0.035	0.234	1.30
9	30.	0.92	1.70	0.450	0.06	0.045	0.234	1.36
10	50.	0.92	1.40	0.500	0.08	0.045	0.078	1.42
11	60.	0.92	1.20	0.400	0.09	0.045	0.039	1.30
12	40.	0.92	1.60	0.300	0.07	0.045	0.156	1.26
13	30.	0.23	1.40	0.400	0.06	9.925	0.078	1.30
14	50.	0.23	1.70	0.300	0.08	0.025	0.234	1.26
15	60.	0.23	1.60	0.450	0.09	0.025	0.156	1.36
16	40.	0.23	1.20	0.500	0.07	0.025	0.039	1.42
cond (A) = 7.86					cond (A) = 22.5			

Таблица 4

Эксперимент - матрица A - при ВД3 в зависимости от первой и второй групп факторов.							
VAR	$\beta_0$	$x_{op}$	$i_f$	$i_d$	$x_\sigma$	$x_{\sigma d}$	$x_{ad}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	30.	0.04	1.20	0.600	0.06	0.039	1.24
2	50.	0.04	1.60	0.700	0.08	0.039	1.36
3	60.	0.04	1.70	0.900	0.09	0.039	1.42
4	40.	0.04	1.40	0.800	0.07	0.039	1.30
5	30	0.23	1.60	0.900	0.06	0.156	1.36
6	50.	0.23	1.20	0.800	0.08	0.156	1.24
7	60.	0.23	1.40	0.600	0.09	0.156	1.30
8	40.	0.23	1.70	0.700	0.07	0.156	1.42

1	2	3	4	5	6	7	8
9	30.	0.46	1.70	0.800	0.06	0.234	1.42
10	50.	0.46	1.40	0.900	0.08	0.234	1.30
11	60.	0.46	1.20	0.700	0.09	0.234	1.24
12	40.	0.46	1.60	0.600	0.07	0.234	1.36
13	30.	0.115	1.40	0.700	0.06	0.078	1.30
14	50.	0.115	1.70	0.600	0.08	0.078	1.42
15	60.	0.115	1.60	0.800	0.09	0.078	1.36
16	40.	0.115	1.20	0.792	0.07	0.078	1.24
cond (A) = 7.95					cond (A) = 19.8		

Для построения статистических моделей определения гармонического состава фазных токов ВДПТЗ и ВДПТ6, в зависимости от разных групп факторов, была принята за базу мультипликативная модель статистических уровней, лучше других описывающая сложные нелинейные зависимости [2], что имеет место в этом случае:

$$y = K_0 \cdot X_1^{k_1} \cdot X_1^{k_2} \dots X_1^{k_n}, \quad (1)$$

откуда путем замены переменных, уравнение (1) преобразуем в линейный тип представления уравнения:

$$Y = K_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots k_n X_n, \quad (2)$$

где  $Y = I_{ny}$ ;  $K_0 = I_{nk0}$ ;  $X_1 = I_{nx1}$ ; ...;  $X_n = I_{nxn}$ .

Здесь  $y$  – исследуемая функция,  $x_1, \dots, x_n$  – факторы (индекс  $n$  – их количество);  $k_0, k_1, \dots, k_n$  – постоянные статистические коэффициенты уравнения (1).

Уравнение (2) можно представить в матричном виде:

$$b = A \cdot C, \quad (3)$$

где  $b$  – по сути матрица-столбец преобразованных откликов исследуемой функции, количество строк которой равно числу опытов для каждого типа экспериментов (здесь 16 опытов);  $A$  – это ранее описанная факторная матрица  $A$  (табл.3, 4);  $C$  – матрица постоянных статистических коэффициентов уравнения (2) –  $k_0, k_1, \dots, k_n$ , которые неизвестны на этом этапе вычислений.

Задача определения неизвестных постоянных коэффициентов статистических уровней решается наиболее эффективно – методом сингулярного разложения матриц, реализованная в стандартную программу на – SVD [3], по которой получаем набор всех постоянных коэффициентов статистического уровня.

Далее, подставляя эти коэффициенты в уравнение (1), рассчитываются значения  $Y$  исследуемой функции, которые сравниваются со значениями функции  $y$ , полученными из численного эксперимента по ма-

тематической модели [1], при этом определяются статистические критерии достоверности и надежности полученных коэффициентов – критерии Фишера (F) и Стьюдента (ST), коэффициент множественной корреляции. Запишем статистические уравнения исследуемых функций гармонического состава фазного тока статора ВДПТ в зависимости от факторов обеих групп. Так, для ВДПТ6 уравнение будет следующим:

$$y_i = K_0 \beta_{0*}^{k_1} \cdot x_{dp*}^{k_2} \cdot i_{f*}^{k_3} \cdot i_{d*}^{k_4}, \quad (4)$$

$$y_i = K_0 x_{\sigma*}^{k_1} \cdot x_{\sigma 1,2*}^{k_2} \cdot x_{\sigma d*}^{k_3} \cdot x_{ad*}^{k_4}, \quad (5)$$

где  $\beta_{0*} = \frac{\beta_0}{45}$  о.е.;  $x_{dp*} = \frac{x_{dp}}{0,345}$  о.е.;  $i_{f*} = \frac{i_f}{1,45}$  о.е.;  $i_{d*} = \frac{i_d}{0,4125}$  о.е.,

$$x_{\sigma*} = \frac{x_{\sigma}}{0,075} \text{ о.е.}; \quad x_{\sigma 1,2*} = \frac{x_{\sigma 1,2}}{0,03} \text{ о.е.}; \quad x_{\sigma d*} = \frac{x_{\sigma d}}{0,117} \text{ о.е.}; \quad x_{ad*} = \frac{x_{ad}}{1,33} \text{ о.е.}$$

Изложенное выше справедливо также и для ВДПТ3, уравнения которого имеют идентичный уравнениям (4), (5) вид по каждой группе факторов.

$$y_i = K_0 \beta_{0*}^{k_1} \cdot x_{dp*}^{k_2} \cdot i_{f*}^{k_3} \cdot i_{d*}^{k_4}, \quad (6)$$

$$y_i = K_0 x_{\sigma*}^{k_1} \cdot x_{\sigma d*}^{k_3} \cdot x_{ad*}^{k_4}, \quad (7)$$

где  $\beta_{0*} = \frac{\beta_0}{45}$  о.е.;  $x_{dp*} = \frac{x_{dp}}{0,1725}$  о.е.;  $i_{f*} = \frac{i_f}{1,45}$  о.е.;  $i_{d*} = \frac{i_d}{0,75}$  о.е.,

$$x_{\sigma*} = \frac{x_{\sigma}}{0,075} \text{ о.е.}; \quad x_{\sigma d*} = \frac{x_{\sigma d}}{0,117} \text{ о.е.}; \quad x_{ad*} = \frac{x_{ad}}{1,33} \text{ о.е.}$$

Таким образом, по уравнениям (4)-(7) определяется функциональная зависимость не только от совокупности всех факторов, но и по каждому из вышеперечисленных параметров в отдельности.

Разработанные статистические модели для расчета формы кривой тока якоря отличаются простотой и инженерной применимостью на любом этапе разработки или создания вентильных двигателей постоянного тока.

1. Волчуков Н.П. Цифровое моделирование высокоиспользованных автономных систем электромеханического преобразования энергии: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. – Харьков, 1996. – 424 с.

2. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

3. Чернявская М.В., Глебова М.Л., Карпалюк И.Т. Описание математической модели вентильного двигателя с использованием модульного принципа // Коммунальное хозяй-

ство городов: Науч.-техн. сб. Вып.88. Серия «Технические науки». – К.: Техніка, 2009. – С.223 – 232.

*Получено 12.11.2011*

УДК 621. 31 : 338. 246

А.В.САПРЫКА, канд. техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА В ОСВЕТИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ОТ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ГОДОВОГО РАСХОДА НА ЗАМЕНУ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА**

Рассматривается проблема оценки экономического ущерба осветительного комплекса от снижения качества электрической энергии с учетом годового расхода на замену источников света на коммунальных предприятиях города.

Розглядається проблема оцінки економічного збитку освітлювального комплексу від зниження якості електричної енергії з урахуванням річної витрати на заміну джерел світла на комунальних підприємствах міста.

The problem of estimation of economic harm of lighting complex is examined from the decline of quality of electric energy taking into account an annual expense on replacement of sources of light in the communal enterprises of city.

*Ключевые слова:* оценка экономического ущерба, качество электрической энергии, годовой расход, источник света, осветительный комплекс.

Одним из вопросов экономического обоснования оптимального уровня электроснабжения осветительного комплекса является оценка его экономического ущерба от снижения качества электрической энергии с учетом годового расхода на замену источников света на коммунальных предприятиях города.

Анализ опубликованных работ по вопросу оценки экономических ущербов (потерь) от ненадежности электроснабжения и снижения качества электроэнергии (КЭ) позволил выявить, что в течение последних десятилетий активность исследований проблем ущербов от нарушений электроснабжения потребителей значительно снизилось [1-5, 8, 9]. К наиболее существенным разработкам в данной области относятся работы А.К.Шидловского, В.Г.Кузнецова, Л.М.Зельцбурга, А.А.Заики [1-3] и др. В современных исследованиях рассматриваются, в основном, только методические вопросы, которые базируются на ранее разработанных методических положениях [6].

Целью данной работы является оценка экономического ущерба осветительного комплекса от снижения качества электрической энергии с учетом годового расхода на замену источников света.

Согласно [1, 7], ежегодный экономический ущерб от снижения качества электрической энергии определяется как сумма ущерба от не-